

Попов С.А., Ташлыков О.Л.

РАЗРАБОТКА БЫСТРОСЪЕМНОЙ КОМБИНИРОВАННОЙ РАДИАЦИОННОЙ И ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ ОБОРУДОВАНИЯ И СИСТЕМ АЭС

Аннотация. В работе рассмотрены пути снижения дозозатрат при ремонтном обслуживании АЭС, проведено сравнение обычной и быстросъемной тепловой изоляции, приведены требования к быстросъемной тепловой изоляции. Выполнен сравнительный анализ обычной и быстросъемной тепловой изоляции по трудозатратам на монтаж и демонтаж. Разработана конструкция быстросъемной комбинированной радиационной и тепловой защиты оборудования и систем АЭС, предназначенная для снижения доз облучения путем экранирования и уменьшения времени пребывания в радиационных полях.

Ключевые слова: теплоизоляция, радиационно-защитный экран, атомная электрическая станция, коллективная доза, быстросъемная теплоизоляция.

Abstract. The paper discusses ways to reduce doses in repair and maintenance of nuclear power plants, a comparison of conventional and quick-release thermal insulation, the requirements for quick-release thermal insulation. Comparative analysis of conventional and quick-detachable thermal insulation on labor costs for assembly and disassembly. The construction of the quick-release combined radiation shielding and heat insulation for NNP's equipment and systems is considered. It is meant for decreasing radiation doses by shielding and shortening of time periods in radiation fields.

Keywords: insulation, radiation protective shielding, nuclear power plant, collective dose, quick-release thermal insulation.

Введение

Радиационная обстановка в помещениях АЭС во время ремонта определяется γ -излучением активированных продуктов коррозии, сосредоточенных в отложениях на поверхности оборудования, среди которых основной вклад дает ^{60}Co . Коллективные дозы меняются в широких пределах в зависимости от типа реактора и составляют от 0,67 (среднее значение для несерийных блоков – Билибинской и Белоярской АЭС) до 4,42 (среднее значение для АЭС с РБМК-1000) чел·Зв/энергоблок [1].

Соотношение дозозатрат в период проведения плановых ремонтов и эксплуатации на энергоблоках с РБМК составляет примерно 50 на 50%. На энергоблоках с ВВЭР 80-90% коллективной дозы приходится на время ремонта энергоблоков [2].

В таблице 1 представлены усредненные значения коллективной дозы по отдельным видам работ на энергоблоках АЭС с ВВЭР-1000 за периоды плановых ремонтов.

Таблица 1 – Усредненные значения коллективной дозы

Оборудование и виды работ	Коллективная доза, чел·мЗв/блок	
	2000–2002	2007–2009
Перегрузка	26	23
Реактор	255	253
ГЦН	52	33
Системы отвода остаточного тепло-выделения	20	17
Парогенераторы	175	64
Система подпитки и борного регулирования	19	23
Компенсатор давления	22	9
Теплоизоляция	90	41

Как видно из таблицы 1, основное снижение доз в указанные периоды времени произошло на следующих видах работ и оборудования: главные циркуляционные насосы, парогенераторы, компенсатор давления и выполнение работ с теплоизоляцией [3].

Тепловая изоляция является неотъемлемым элементом теплоэнергетического оборудования, влияющим на надежность и экономичность АЭС.

Назначение тепловой изоляции оборудования и трубопроводов первого и второго контура, парогенераторов и главных паропроводов – снижение тепловых потерь от оборудования и трубопроводов в окружающую среду при эксплуатации реакторной установки и обеспечение:

- энергоэффективности;
- надежности и долговечности эксплуатации теплоизоляционных конструкций без снижения теплозащитных свойств;
- выполнения требований безопасности и защиты окружающей среды;
- возможности систематического наблюдения (мониторинга) в процессе эксплуатации за элементами изолируемых объектов в местах измерений и проверки состояния поверхностей изолируемых объектов;
- удобства обслуживания и ремонта изолируемых объектов.

Существует три метода снижения дозозатрат в период ремонтных кампаний на АЭС, это снижение радиационного параметра, увеличение расстояния от радиоактивного оборудования до работника и уменьшение времени пребывания персонала вблизи радиоактивного оборудования [4].

Для проведения периодических осмотров и ремонтов оборудования тепловую изоляцию необходимо демонтировать, а затем восстанавливать, что требует значительных трудозатрат. Как показывает опыт проведения ремонтных работ на энергоблоках АЭС первого поколения, значительный вклад в коллективную дозу облучения персонала вносили работы по снятию и установке теплоизоляции традиционной конструкции [5].

Использование быстросъемной тепловой изоляции, выполненной в виде блоков, устанавливаемых на оборудование с помощью крепежных устройств, позволяет экономить время на монтаже, тем самым снизив радиационную нагрузку на персонал и уменьшить коллективную дозу.

Как показывают проведенные расчетные оценки, использование быстросъемной теплоизоляции вместо обычной тепловой изоляции на атомных станциях позволяет сократить коллективную дозу на 27-38% при монтаже и на 31-63% при демонтаже теплоизоляции (рис.1).

Например, применение быстросъемной теплоизоляции на Калининской АЭС в период с 2008 по 2010 гг. позволило снизить коллективную дозу на 23-30 чел·мЗв [3].

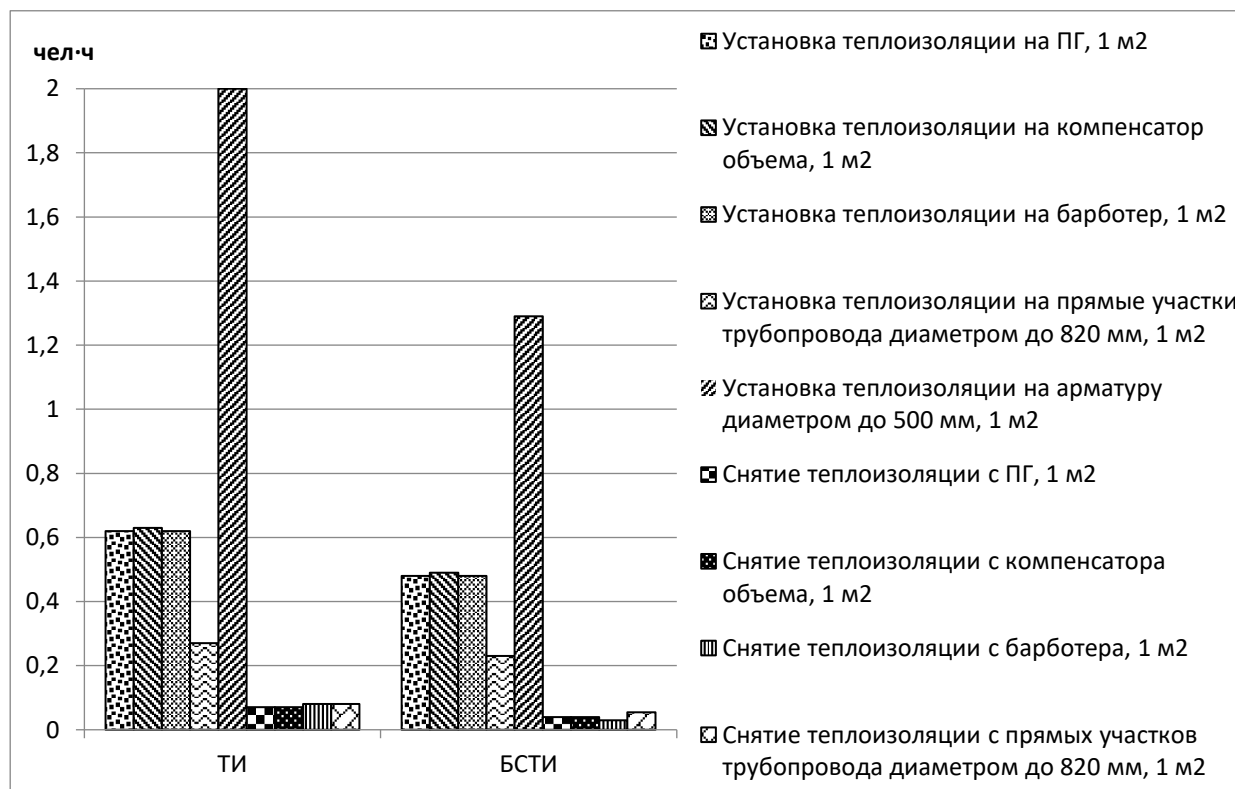


Рисунок 1 – Трудозатраты на установку и снятие теплоизоляции и быстросъемной теплоизоляции.

Материалы и методика исследования

В представленной работе рассматривается использование комбинированной быстросъемной тепловой изоляции и радиационной защиты, выполненной в виде блоков, устанавливаемых на оборудование с помощью крепежных устройств, на наружную поверхность которых установлен радиационно-защитный экран. Использование такой комбинированной защиты позволяет сократить время на монтаж-демонтаж радиационной защиты и теплоизоляции, снизив тем самым радиационную нагрузку на персонал и уменьшив коллективную дозу. В обслуживаемых помещениях с радиоактивными системами использование такой защиты позволяет снизить радиационный фон в рабочих зонах.

Тепловая изоляция на оборудовании и трубопроводах должна отвечать следующим требованиям [6]:

- средние удельные тепловые потери с наружной поверхности теплоизоляции каждой единицы оборудования и трубопроводов не должны превышать 290 Вт/м^2 ;
- температура наружной поверхности оборудования, расположенного в помещениях, доступных для осмотра при работе блока на мощности не должна превышать 60°C ;
- тепловая изоляция не должна впитывать воду, загрязняться радиоактивными элементами;
- конструкция быстросъемной теплоизоляции должна быть разработана исходя из условия надежного выполнения ее функций и сохранения прочности при воздействии эксплуатационных и сейсмических нагрузок, возникающих при эксплуатации быстросъемной теплоизоляции в режимах нормальной эксплуатации, нарушения нормальной эксплуатации, максимальной проектной аварии, а также при сочетании указанных условий с максимальным расчетным землетрясением;
- крепление блоков быстросъемной теплоизоляции на оборудовании и трубопроводах должно осуществляться без применения сварки с помощью быстросъемных замков, что позволяет производить быстрый локальный демонтаж блоков для периодического осмотра и эксплуатационного контроля основного металла и сварных соединений;
- металлопокрытие теплоизолирующей конструкции должно быть выполнено в брызгозащитном исполнении, исключающем попадание внутрь теплоизоляции дезактивирующих растворов, масла;

- температура наружной поверхности теплоизоляции в местах, доступных для персонала не должна превышать 45°C;
- в качестве теплоизоляционного материала для быстросъемной теплоизоляции могут применять маты марки МТП-АС из супертонкого стекловолокна или другие теплоизоляционные материалы, обладающие необходимыми показателями по стойкости в условиях гермообъема реакторной установки атомной электростанции.
- массогабаритные характеристики блоков быстросъемной теплоизоляции должны позволять манипулировать ими без применения грузоподъемных механизмов.

Модель

Для исследования характеристик быстросъемной комбинированной тепловой и радиационной защиты была проведено моделирование процесса теплопередачи в программном пакете SolidWorks. Первым этапом моделирования было создание твердотельной модели. В качестве модели был выбран трубопровод длиной 1 м и диаметром 200 мм, окруженный слоем тепловой изоляции определенной толщины и слоем радиационно защитного экрана толщиной 20 мм. Толщина тепловой изоляции выбиралась из нескольких условий: во-первых, согласно требованиям, предъявляемым к тепловой изоляции, температура на поверхности трубопровода в помещениях, в которые возможен доступ персонала, не должна превышать 45°C; во-вторых, предел температуры эксплуатации для радиационно-защитного экрана, установленный заводом изготовителем, составляет 70 °C, поэтому данная температура не должна быть превышена в любой точке радиационно-защитного экрана.

Для упрощения модели материал трубопровода не учитывался, так как сталь обладает высокой теплопроводностью и практически не вносит вклада в термическое сопротивление. Греющей средой выбрана вода при температуре от 100 до 225°C со скоростью потока 2 м/с с развитым профилем течения. Измерения проводились с шагом в 25°C. Снаружи труба омывается воздухом при температуре 20°C в режиме свободной конвекции.

Образцы и методика эксперимента

В качестве защитного экрана предлагается использовать материал Абрис, представляющий собой гомогенную композицию на основе полимерного связующего и наполнителя необходимой концентрации с учетом изотопного состава радиоактивного загрязнения. Завод-изготовитель радиационно-

защитных экранов в качестве добавки предлагает использовать вольфрам, свинец, барит и другие. Также в состав экрана могут входить асбест, различные углеводороды, известь [7].

За счет того, что радиационно защитный экран обладает изолирующими свойствами, можно уменьшить толщину теплоизоляционного слоя.

В качестве теплоизоляции наиболее рациональным решением будет использовать маты из изоляционным материалов, обычно применяемых в энергетике. Согласно требованиям к теплоизоляции трубопроводов с положительными температурами теплопроводность изоляции не должна превышать 0,07 Вт/(м·К). Исходя из этого условия, был принят коэффициент теплопроводности изоляции 0,04 Вт/(м·К).

Коэффициент теплопроводности радиационно-защитного материала Абрис был получен при помощи установки NETZSCH HFM 436 Lambda. Данный прибор соответствует ГОСТ 7076-99 и международным стандартам, и позволяет производить измерения материалов с низкими коэффициентами теплопроводности с достаточно большой точностью, скоростью и воспроизводимостью результатов.

Основная трудность при измерении заключалась в том, что образцы обладают не одинаковой толщиной в различных точках поверхности и неоднородной плотностью, что снижает точность результатов.

Результаты измерений для радиационно-защитных экранов представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Коэффициент теплопроводности радиационно-защитных экранов

№	Образец	$t_{cp}, ^\circ C$	$\Delta t, ^\circ C$	Толщина, см	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	Массовая концентрация
1	659	50	16,57	2,188	0,3682	25% барит
2	653	50	20	2,1416	0,3479	50% барит
3	648	50	20	2,3109	0,3043	75% барит
4	1043	50	20	2,2662	0,3641	20% свинец

В модели использовался экран с массовым содержанием свинца 20%.

Результаты и обсуждение

Расчет производился по формулам, представленным в справочнике [8] для соответствующего режима, а также в программном пакете SolidWorks.

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot L^3}{\nu^2}, \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с;
 β – коэффициент теплового расширения воздуха, $1/^\circ\text{C}$;
 Δt – разность температур сред, $^\circ\text{C}$;
 L – характерный размер, м (для горизонтальных труб d);
 ν – кинематическая вязкость воздуха, $\text{м}^2/\text{с}$.

$$Nu = 0,5 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,25} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_c} \right)^{0,25}, \quad (2)$$

где Pr – число Прандтля для воздуха

Pr_c – число Прандтля для воздуха при температуре стенки.

$$\alpha_2 = \frac{Nu \cdot \lambda}{d + 2 \cdot \delta_u + 2 \cdot \delta_э}, \quad (3)$$

где λ – коэффициент теплопроводности воздуха, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$

d – наружный диаметр трубы, м

δ_u – толщина изоляции, м

$\delta_э$ – толщина экрана, м.

Линейная плотность теплового потока рассчитывается по формуле

$$q_l = \frac{\pi \cdot (t_2 - t_1)}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_u} \ln \left(\frac{d + 2 \cdot \delta_u}{d} \right) + \frac{1}{2 \cdot \lambda_э} \ln \left(\frac{d + 2 \cdot \delta_u + 2 \cdot \delta_э}{d + 2 \cdot \delta_u} \right) + \frac{1}{\alpha_2 \cdot (d + 2 \cdot \delta_u + 2 \cdot \delta_э)}}, \quad (4)$$

где t_1 – температура воздуха, $^\circ\text{C}$

t_2 – температура воды, $^\circ\text{C}$

α_1 – коэффициент теплоотдачи от воды к трубе, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$

λ_u – коэффициент теплопроводности изоляции, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$

$\lambda_э$ – коэффициент теплопроводности экрана, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

$$t_{нов1} = t_1 - \frac{q_l}{\pi} \left(\frac{1}{\alpha_1 \cdot d} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_u} \ln \left(\frac{d + 2 \cdot \delta_u}{d} \right) \right) = 46,56^\circ\text{C}, \quad (5)$$

$$t_{нов2} = t_1 - \frac{q_l}{\pi} \left(\frac{1}{\alpha_1 \cdot d} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_u} \ln \left(\frac{d + 2 \cdot \delta_u}{d} \right) + \frac{1}{2 \cdot \lambda_э} \ln \left(\frac{d + 2 \cdot \delta_u + 2 \cdot \delta_э}{d + 2 \cdot \delta_u} \right) \right) = 41,60^\circ\text{C}, \quad (6)$$

Таблица 3 – Параметры трубопровода при расчете по формулам

Температура воды, °С	100	125	150	175	200	225
Толщина изоляции, мм	20	30	40	50	60	70
Линейная плотность теплового потока, Вт/м	73,64	75,73	78,13	80,55	83,06	85,53
Температура поверхности изоляции, °С	46,56	45,94	45,39	45,04	44,65	44,41
Температура поверхности экрана, °С	41,60	41,20	40,83	40,63	40,37	40,26
Коэффициент теплоотдачи к воздуху, Вт/(м ² ·К)	3,876	3,790	3,731	3,655	3,605	3,537

Таблица 4 – Параметры трубопровода при расчете в программном пакете SolidWorks

Температура воды, °С	100	125	150	175	200	225
Толщина изоляции, мм	20	30	40	50	60	70
Линейная плотность теплового потока, Вт/м	66,55	71,67	74,36	76,78	81,06	82,93
Температура поверхности изоляции, °С	49,04	49,21	48,61	48,59	47,90	47,56
Температура поверхности экрана, °С	44,62	44,59	44,12	44,18	43,41	43,31
Коэффициент теплоотдачи к воздуху, Вт/(м ² ·К)	3,062	3,112	3,118	3,001	3,096	3,009

Распределения температур по сечению теплоизоляции и радиационно-защитного экрана представлены на рисунках 2 и 3.

Проанализировав полученные результаты, представленные в таблицах 3 и 4, можно сделать вывод, что температура на поверхности трубопровода не превышает 45 °С, что соответствует требованиям, предъявляемым к теплоизоляции трубопроводов, а температура по всей толщине радиационно-защитного экрана находится в рабочих пределах от -40°С до +70°С. Расхождения в результатах расчётов температур поверхностей при вычислении по формулам и при помощи программного пакета SolidWorks составляют 5-8%, что показывает хорошую сходимость результатов.

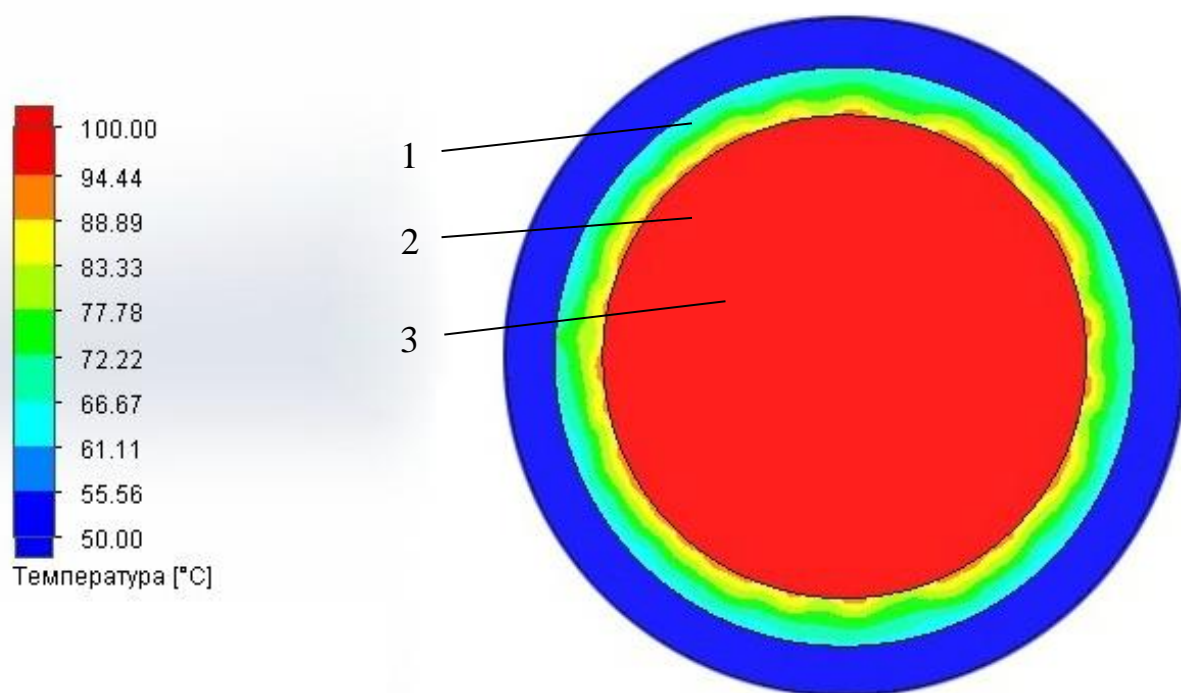


Рисунок 2 – Распределение температуры в тепловой изоляции:
1 – радиационно-защитный экран, 2 – теплоизоляция, 3 – греющая среда.

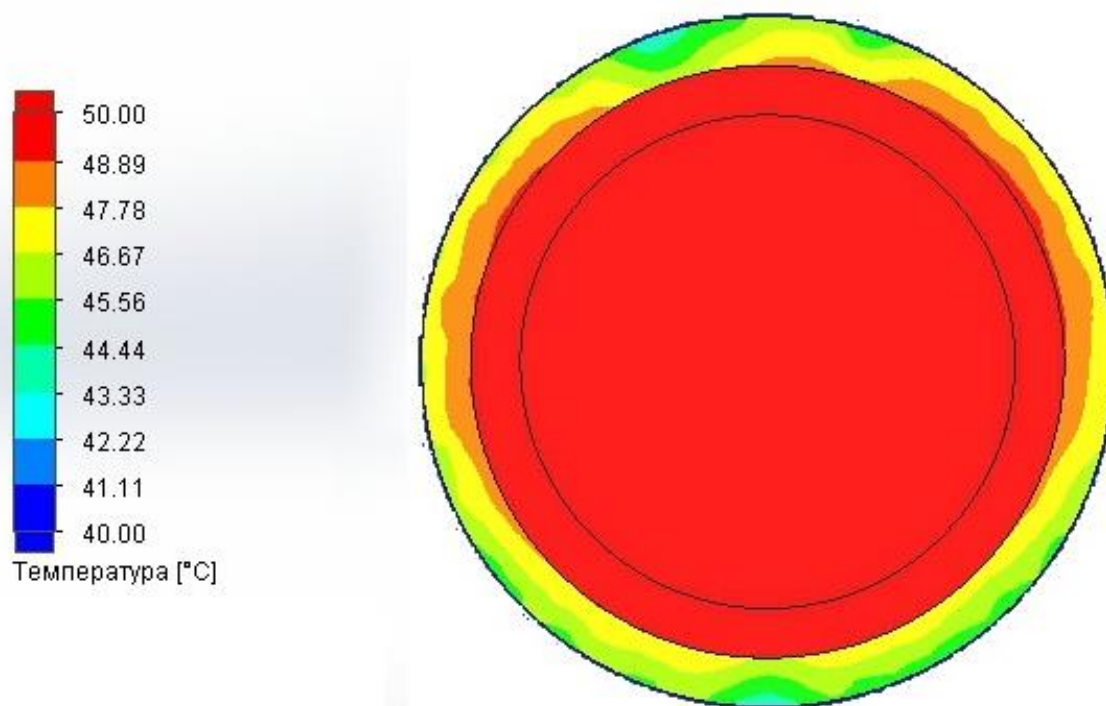


Рисунок 3 – Распределение температуры в радиационно-защитном экране

Заключение

Применение данной комбинированной быстросъемной тепловой и радиационной защиты позволит воздействовать сразу на два параметра. Помимо

уменьшения времени на монтаж и демонтаж изоляции на время ремонтных работ, для выполнения операций по контролю металла и в других случаях, требующих удаления изоляции, эта конструкция также позволяет снизить дозовые нагрузки на персонал во время работы оборудования путем экранирования трубопроводов с радиоактивным теплоносителем от внешней среды. Также стоит отметить, что несомненным плюсом быстросъемной теплоизоляции является то, что теплоизоляционный материал находится в коробе, который защищает его от повреждений и рассыпания, тем самым уменьшая количество радиоактивных отходов, образующихся в результате установки и демонтажа теплоизоляции.

Библиографический список

1. Повышение Эффективности локализации радионуклидов кобальт-60 и цезий-137 из жидких радиоактивных отходов в решении проблемы обеспечения радиационной безопасности АЭС / В. П. Ремез [и др.] // Ядерная физика и инжиниринг. – 2016. – Т. 7, № 2. – С. 129–137.
2. Ташлыков О. Л. Ремонт оборудования атомных станций / О. Л. Ташлыков. – Екатеринбург : Изд-во УМЦ УПИ, 2003. – 97 с.
3. Таширева И. А. Использование быстросъемной тепловой изоляции на АЭС / И. А. Таширева, О. Л. Ташлыков // Конференция молодых ученых–2017 : тр. Второй науч.-техн. конф. молодых ученых Урал. энергет. ин-та. – Екатеринбург : УрФУ, 2017. – С. 365–368.
4. Наумов А. А. Минимизация дозовых затрат при ремонтном обслуживании систем и оборудования АЭС / А. А. Наумов, О. Л. Ташлыков // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2010. – № 1. – С. 80–88.
5. Ташлыков О. Л. Методы оценки и снижения дозовых нагрузок при ремонте АЭС / О. Л. Ташлыков. – Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2009. – 118 с.
6. Нормы проектирования тепловой изоляции оборудования и трубопроводов атомных станций [Электронный ресурс] : РД ЭО 0586-2004 : утв. ОАО «Концерн Росэнергоатом» 28.12.2004. – Режим доступа: <http://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293759/4293759840.htm>.
7. Experimental and Theoretical Study of Organometallic Radiation-Protective Materials Adapted to Radiation Sources with a Complex Isotopic Composition / I. M. Russkikh [et al.] // Physics of Atomic Nuclei. – 2015. – Vol. 78, № 12. – P. 1451–1456.
8. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров : справочник : пер. с англ. / Х. Уонг. – Москва : Атомиздат, 1979. – 216 с.